



Docket No.: 50212-514

PATENT

IN THE UNITED STATES PATENT AND TRADEMARK OFFICE

In re Application of : Customer Number: 20277
Motoki KAKUI, et al. : Confirmation Number: 8492
Serial No.: 10/615,389 : Group Art Unit:
Filed: July 09, 2003 : Examiner:
For: OPTICAL AMPLIFICATION MODULE OPTICAL AMPLIFICATION APPARATUS AND OPTICAL COMMUNICATIONS SYSTEM

TRANSMITTAL OF CERTIFIED PRIORITY DOCUMENT

Mail Stop Missing Parts
Commissioner for Patents
P.O. Box 1450
Alexandria, VA 22313-1450

Sir:

At the time the above application was filed, priority was claimed based on the following application:

Japanese Patent Application No. 2002-201827, filed July 10, 2002

A copy of each priority application listed above is enclosed.

Respectfully submitted,

MCDERMOTT, WILL & EMERY

Arthur J. Steiner
Registration No. 26,106

600 13th Street, N.W.
Washington, DC 20005-3096
(202) 756-8000 AJS:prg
Facsimile: (202) 756-8087
Date: January 22, 2004

日本国特許庁
JAPAN PATENT OFFICE

50212-574
Kakui et al.
July 9, 2003
10/615,389
McDermott, Will & Emery

別紙添付の書類に記載されている事項は下記の出願書類に記載されて
いる事項と同一であることを証明する。

This is to certify that the annexed is a true copy of the following application as filed
with this Office

出願年月日

Date of Application:

2002年 7月10日

出願番号

Application Number:

特願2002-201827

[ST.10/C]:

[JP2002-201827]

出願人

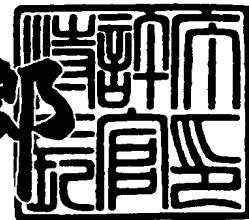
Applicant(s):

住友電気工業株式会社

2002年 8月27日

特許庁長官
Commissioner,
Japan Patent Office

太田信一郎



出証番号 出証特2002-3066595

【書類名】 特許願

【整理番号】 102Y0413

【提出日】 平成14年 7月10日

【あて先】 特許庁長官殿

【国際特許分類】 H01S 3/10

【発明者】

【住所又は居所】 神奈川県横浜市栄区田谷町1番地 住友電気工業株式会社横浜製作所内

【氏名】 角井 素貴

【発明者】

【住所又は居所】 神奈川県横浜市栄区田谷町1番地 住友電気工業株式会社横浜製作所内

【氏名】 宮本 敏行

【発明者】

【住所又は居所】 神奈川県横浜市栄区田谷町1番地 住友電気工業株式会社横浜製作所内

【氏名】 高城 政浩

【特許出願人】

【識別番号】 000002130

【氏名又は名称】 住友電気工業株式会社

【代理人】

【識別番号】 100088155

【弁理士】

【氏名又は名称】 長谷川 芳樹

【選任した代理人】

【識別番号】 100089978

【弁理士】

【氏名又は名称】 塩田 辰也

【選任した代理人】

【識別番号】 100092657

【弁理士】

【氏名又は名称】 寺崎 史朗

【選任した代理人】

【識別番号】 100110582

【弁理士】

【氏名又は名称】 柴田 昌聰

【手数料の表示】

【予納台帳番号】 014708

【納付金額】 21,000円

【提出物件の目録】

【物件名】 明細書 1

【物件名】 図面 1

【物件名】 要約書 1

【包括委任状番号】 0106993

【プルーフの要否】 要

【書類名】 明細書

【発明の名称】 光増幅モジュール、光増幅装置および光通信システム

【特許請求の範囲】

【請求項1】 酸化B_i系ホストガラスからなり光導波領域にE_r元素が添加されたB_i系光導波路と、

前記B_i系光導波路に励起光を供給して前記B_i系光導波路に反転分布を生じさせる励起光供給手段とを備え、

波長1610nm以上の波長域を含む信号光波長帯域の多波長信号光を前記B_i系光導波路において一括光増幅する

ことを特徴とする光増幅モジュール。

【請求項2】 何れかの動作温度において、前記B_i系光導波路の正味利得スペクトルが最も平坦となるように前記励起光供給手段により前記B_i系光導波路に供給される励起光のパワーを調整して前記反転分布を調整したときに、前記B_i系光導波路の正味利得スペクトルにおける相対利得偏差が25%未満であることを特徴とする請求項1記載の光増幅モジュール。

【請求項3】 前記相対利得偏差が19%未満であることを特徴とする請求項2記載の光増幅モジュール。

【請求項4】 全動作温度範囲内において、前記B_i系光導波路の正味利得スペクトルが最も平坦となるように前記励起光供給手段により前記B_i系光導波路に供給される励起光のパワーを調整して前記反転分布を調整したときに、前記B_i系光導波路の正味利得スペクトルにおける相対利得偏差が25%未満であることを特徴とする請求項1記載の光増幅モジュール。

【請求項5】 前記相対利得偏差が19%未満であることを特徴とする請求項4記載の光増幅モジュール。

【請求項6】 全動作温度範囲内において、前記B_i系光導波路の正味利得スペクトルが最も平坦となるように前記励起光供給手段により前記B_i系光導波路に供給される励起光のパワーを調整して前記反転分布を調整したときに、前記B_i系光導波路の正味利得スペクトルにおける相対利得偏差が25%未満となる波長帯域幅が37nmを超えることを特徴とする請求項1記載の光増幅モジュー

ル。

【請求項 7】 前記波長帯域幅が 50 nm を超えることを特徴とする請求項 6 記載の光増幅モジュール。

【請求項 8】 全動作温度範囲内において、前記 Bi 系光導波路の正味利得スペクトルが最も平坦となるように前記励起光供給手段により前記 Bi 系光導波路に供給される励起光のパワーを調整して前記反転分布を調整したときに、前記 Bi 系光導波路の正味利得スペクトルにおける相対利得偏差が 19 % 未満となる波長帯域幅が 37 nm を超えることを特徴とする請求項 1 記載の光増幅モジュール。

【請求項 9】 前記波長帯域幅が 50 nm を超えることを特徴とする請求項 8 記載の光増幅モジュール。

【請求項 10】 前記 Bi 系光導波路またはその近傍の温度を検出する温度検出素子を更に備えることを特徴とする請求項 1 記載の光増幅モジュール。

【請求項 11】 前記 Bi 系光導波路またはその近傍の温度を調整する温度調整素子を更に備えることを特徴とする請求項 1 記載の光増幅モジュール。

【請求項 12】 前記多波長信号光の伝送経路上に設けられ前記多波長信号光に対する損失特性が可変である光損失部品を更に備えることを特徴とする請求項 1 記載の光増幅モジュール。

【請求項 13】 前記光損失部品が可変光減衰器であることを特徴とする請求項 12 記載の光増幅モジュール。

【請求項 14】 前記 Bi 系光導波路の背景損失 α_B (単位 dB/m) と Er による吸収ピーク α (単位 dB/m) との間に

$$\alpha_B \leq 0.021 \alpha$$

なる関係式が成り立つことを特徴とする請求項 1 記載の光増幅モジュール。

【請求項 15】 前記 Bi 系光導波路の背景損失 α_B (単位 dB/m) と Er による吸収ピーク α (単位 dB/m) との間に

$$\alpha_B \leq 0.015 \alpha$$

なる関係式が成り立つことを特徴とする請求項 1 記載の光増幅モジュール。

【請求項 16】 前記 Bi 系光導波路が光ファイバであることを特徴とする

請求項1記載の光増幅モジュール。

【請求項17】 前記励起光供給手段は、中心出力波長が最高出力時に1453nm～1473nmの範囲にある光源を含むことを特徴とする請求項1記載の光増幅モジュール。

【請求項18】 前記励起光供給手段は、中心出力波長が常時1453nm～1473nmの範囲にある光源を含むことを特徴とする請求項1記載の光増幅モジュール。

【請求項19】 前記励起光供給手段は、

光反射面と光出射面とを有する半導体発光素子と、

前記半導体発光素子の前記光出射面より出射された光のうち特定波長の光の一部を反射して、その反射した光を前記光出射面より前記半導体発光素子の内部へ入射させる回折格子と

を含むことを特徴とする請求項1記載の光増幅モジュール。

【請求項20】 前記回折格子は光ファイバ上に形成された光ファイバグレーティングであることを特徴とする請求項19記載の光増幅モジュール。

【請求項21】 石英系ホストガラスからなり光導波領域にEr元素が添加された石英系光導波路を更に備えることを特徴とする請求項1記載の光増幅モジュール。

【請求項22】 前記石英系光導波路が前記多波長信号光の伝送経路上の前記Bi系光導波路の上流に設けられていることを特徴とする請求項21記載の光増幅モジュール。

【請求項23】 前記石英系光導波路が前記多波長信号光の伝送経路上の前記Bi系光導波路の下流に設けられていることを特徴とする請求項21記載の光増幅モジュール。

【請求項24】 前記石英系光導波路が、Al元素およびLa元素の双方または何れか一方とP元素とが共添加されていることを特徴とする請求項21記載の光増幅モジュール。

【請求項25】 請求項1記載の光増幅モジュールを含み、Lバンドに含まれる多波長信号光を前記光増幅モジュールにより光増幅することを特徴とする光

増幅装置。

【請求項26】 請求項25記載の光増幅装置を含み、Lバンドに含まれる多波長信号光を伝送するとともに、その多波長信号光を前記光増幅装置により光増幅することを特徴とする光通信システム。

【発明の詳細な説明】

【0001】

【発明の属する技術分野】

本発明は、信号光を光増幅する光増幅モジュールおよび光増幅装置、ならびに、この光増幅装置を含む光通信システムに関するものである。

【0002】

【従来の技術】

波長分割多重（WDM: Wavelength Division Multiplexing）光通信システムは、或る信号光波長帯域に含まれる多波長の信号光を多重化して伝送するものであり、大容量の情報を高速に送受信することができる。また、WDM光通信システムでは、送受信可能な情報量の更なる大容量化を図るべく、Cバンド（1530 nm～1565 nm）に含まれる多波長信号光だけでなく、Lバンド（1565 nm～1625 nm）に含まれる多波長信号光をも用いることが検討されている。

【0003】

これに対応して、光通信システムにおいて用いられる光増幅装置は、Cバンドの信号光を光増幅するだけでなく、Lバンドの信号光を光増幅するものが求められている。このような光増幅装置としては、石英系ホストガラスからなり光導波領域にEr元素が添加された光ファイバ（EDF: Erbium Doped Fiber）を光増幅媒体として用いるもの（EDFA: Erbium Doped Fiber Amplifier）が知られている。この光増幅装置では、Er元素を励起し得る波長（1.48 μmまたは0.98 μm）の励起光がEDFに供給され、このEDFにおいてCバンドまたはLバンドの信号光が光増幅される。

【0004】

例えば、文献1「A. Mori, et al., ECOC1997, Tech. Dig., p.135」に記載さ

れた光増幅装置では、A1が共添加された石英系EDFが光増幅媒体として用いられており、平坦な利得が長波長側で1600nm付近まで得られている。しかし、この光増幅装置は、Lバンドの多波長信号光を一括光増幅するには、利得が平坦が波長帯域幅が狭い。

【0005】

また、この文献1には、更に長波長側まで平坦な利得を得るべく、テルライト系ホストガラスからなるEDFを光増幅媒体として用いる光増幅装置が提案されている。しかし、テルライトガラスは熱損傷の危険があることから、この光増幅装置は実用的では無い。

【0006】

また、文献2「A. J. G. Ellison, et al., OFC2001, TuA2」には、Sb元素を含む多成分の石英系EDFを光増幅媒体として用いる光増幅装置が提案されている。しかし、Sb元素は有毒であることから、この光増幅装置は実用的では無い。

【0007】

文献3「I. P. Byriel, et al., ECOC2001, Tu.L.3.5」、文献4「角井他、電子情報通信学会総合大会、C-3-28、2002」、および、文献5「S. Tanaka, et al., OFC2002, Tech. Dig., ThJ3」等には、熱損傷や毒性の問題が無いという点で実用的な石英系EDFを光増幅媒体として用いる光増幅装置が記載されている。文献3に記載された石英系EDFの組成は不明であるが、文献4、5に記載された石英系EDFはP元素およびA1元素が共添加されたものである。これらの文献に記載されたEDFでは、利得が長波長側で1620nm付近まで得られている。しかし、波長1580nm付近で利得が顕著に小さく、WDM伝送において重要な利得平坦度が損なわれている。

【0008】

ここで、EDFの利得スペクトルの利得平坦度は、図9で説明される相対利得偏差により評価され得る。図9は、EDFの相対利得偏差の説明図である、この図に示されるように、EDFの利得スペクトルは、利得を有する波長帯域内において大略的に見れば2つの利得極大値と1つの利得極小値とを有する。利得極小

値を G_{min} （単位dB）とし、利得最大値 G_{max} （単位dB）と利得極小値 G_{min} との差を ΔG とする。そして、差 ΔG と利得極小値 G_{min} との比 $(\Delta G / G_{min})$ で相対利得偏差を表す。また、利得極小値 G_{min} 以上の利得が得られている波長帯域を実効的信号波長域と呼ぶ。

【0009】

このように定義した相対利得偏差により利得平坦度を評価すると、文献3に記載されたEDFの相対利得偏差は25%程度であり、文献4に記載されたEDFの相対利得偏差は30%を超え、文献5に記載されたEDFの相対利得偏差は25%程度である。EDFの相対利得偏差が大きすぎると、利得を等化する為に挿入される光フィルタの挿入損失が大きくならざるを得ず、励起効率の劣化や雑音特性の劣化を惹起する。

【0010】

例えば、陸上幹線系で一般に要求される光増幅装置の利得は30dB程度である。この光増幅装置で用いられるEDFの相対利得偏差は25%であるとする。陸上幹線系では、光増幅装置はEDFに加えて分散補償光ファイバをも内蔵するのが一般的であり、この分散補償光ファイバの損失は典型的には10dB程度である。また、光増幅装置には、その他の受動光部品（例えば、光カプラ、光アイソレータ、等）が挿入され、これら受動光部品の挿入損失の合計は6dB程度である。このとき、EDFが実現すべき利得は46dB (=30dB+10dB+6dB)にも達する。また、EDFの相対利得偏差が25%であることから、利得を等化する為に挿入される光フィルタのピーク挿入損失は、11.5dB (=46dB×0.25)にもなり、分散補償光ファイバの損失に匹敵するほどの大きさとなる。このことは、励起効率や雑音特性に大きな悪影響を与えることになる。

【0011】

ところで、既に普及しているCバンド用光増幅装置では、EDFの相対利得偏差は、その石英系EDFに共添加される元素の種類や濃度に依存するが、13~19%程度である。図10は、A1共添加石英系EDFの利得スペクトルを示す図である。ここでは、A1共添加濃度が1重量%，2.5重量%，3.5重量%および5重量%以上それぞれの場合について、利得スペクトルが示されている。

この図から判るように、A1共添加濃度が大きいほど、EDFの相対利得偏差が小さく、EDFの相対利得偏差は13～19%程度である。そこで、Lバンド用光増幅装置でも、EDFの相対利得偏差は、この程度の値が目標値となる。

【0012】

【発明が解決しようとする課題】

以上のように、文献1に記載された光増幅装置は、熱損傷の危険があるテルライト系ホストガラスからなるEDFを光増幅媒体として用いるものであり、実用的では無い。文献2に記載された光増幅装置は、毒性を有するSb元素を含む多成分の石英系EDFを光増幅媒体として用いるものであり、やはり実用的では無い。また、文献3～5それぞれに記載された光増幅装置は、熱損傷や毒性の問題が無いという点で実用的な石英系EDFを光増幅媒体として用いるものではあるが、EDFの相対利得偏差が大きく、励起効率や雑音特性に大きな悪影響を与える懸念がある。

【0013】

本発明は、上記問題点を解消する為になされたものであり、Lバンドにおいて広帯域の実効的信号波長域で小さい相対利得偏差を有することができる実用的な光増幅モジュールおよび光増幅装置を提供することを目的とする。また、この光増幅装置を含み、大容量の情報を送受信することができる光通信システムを提供することをも目的とする。

【0014】

【課題を解決するための手段】

本発明に係る光増幅モジュールは、(1)酸化Bi系ホストガラスからなり光導波領域にEr元素が添加されたBi系光導波路と、(2)Bi系光導波路に励起光を供給してBi系光導波路に反転分布を生じさせる励起光供給手段とを備え、(3)波長1610nm以上の波長域を含む信号光波長帯域の多波長信号光をBi系光導波路において一括光増幅することを特徴とする。本発明に係る光増幅装置は、上記の本発明に係る光増幅モジュールを含み、Lバンドに含まれる多波長信号光を光増幅モジュールにより光増幅することを特徴とする。また、本発明に係る光通信システムは、上記の本発明に係る光増幅装置を含み、Lバンドに含まれる

多波長信号光を伝送するとともに、その多波長信号光を光増幅装置により一括光増幅することを特徴とする。

【0015】

本発明に係る光増幅モジュールでは、酸化Bi系ホストガラスからなり光導波領域にEr元素が添加されたBi系光導波路に励起光が供給されて反転分布が生じ、波長1610nm以上の波長域を含む信号光波長帯域の多波長信号光がBi系光導波路において光増幅される。また、このような光増幅モジュールを含む光増幅装置では、Lバンドに含まれる多波長信号光が光増幅される。また、このような光増幅装置を含む光通信システムでは、Lバンドに含まれる多波長信号光が伝送されるとともに、その多波長信号光が光増幅装置により光増幅される。本発明によれば、Bi系光導波路を光増幅媒体として用いることにより、熱損傷や毒性の問題が無く実用的であり、また、Lバンドにおいて広帯域の実効的信号波長域で小さい相対利得偏差を有することができる。

【0016】

本発明に係る光増幅モジュールは、何れかの動作温度において、Bi系光導波路の正味利得スペクトルが最も平坦となるように励起光供給手段によりBi系光導波路に供給される励起光のパワーを調整して反転分布を調整したときに、Bi系光導波路の正味利得スペクトルにおける相対利得偏差が25%未満であるのが好適であり、相対利得偏差が19%未満であるのが更に好適である。

【0017】

本発明に係る光増幅モジュールは、全動作温度範囲内において、Bi系光導波路の正味利得スペクトルが最も平坦となるように励起光供給手段によりBi系光導波路に供給される励起光のパワーを調整して反転分布を調整したときに、Bi系光導波路の正味利得スペクトルにおける相対利得偏差が25%未満であるのが好適であり、相対利得偏差が19%未満であるのが更に好適である。

【0018】

本発明に係る光増幅モジュールは、全動作温度範囲内において、Bi系光導波路の正味利得スペクトルが最も平坦となるように励起光供給手段によりBi系光導波路に供給される励起光のパワーを調整して反転分布を調整したときに、Bi

系光導波路の正味利得スペクトルにおける相対利得偏差が25%未満となる波長帯域幅が37nmを超えるのが好適であり、波長帯域幅が50nmを超えるのが更に好適である。

【0019】

本発明に係る光増幅モジュールは、全動作温度範囲内において、Bi系光導波路の正味利得スペクトルが最も平坦となるように励起光供給手段によりBi系光導波路に供給される励起光のパワーを調整して反転分布を調整したときに、Bi系光導波路の正味利得スペクトルにおける相対利得偏差が19%未満となる波長帯域幅が37nmを超えるのが好適であり、波長帯域幅が50nmを超えるのが更に好適である。

【0020】

本発明に係る光増幅モジュールは、Bi系光導波路またはその近傍の温度を検出する温度検出素子を更に備えるのが好適であり、また、Bi系光導波路またはその近傍の温度を調整する温度調整素子を更に備えるのが好適である。この場合には、利得の温度依存性が大きいBi系光導波路またはその近傍の温度は、温度検出素子により検出され、或いは、温度調整素子により調整される。

【0021】

本発明に係る光増幅モジュールは、多波長信号光の伝送経路上に設けられ多波長信号光に対する損失特性が可変である光損失部品を更に備えるのが好適であり、その光損失部品が可変光減衰器であるのが好適である。この場合には、Bi系光導波路の正味利得において相対利得偏差を25%以下とすることが可能となる。

【0022】

本発明に係る光増幅モジュールは、Bi系光導波路の背景損失 α_B （単位dB/m）とE_rによる吸収ピーク α （単位dB/m）との間に

$$\alpha_B \leq 0.021\alpha$$

なる関係式が成り立つのが好適であり、

$$\alpha_B \leq 0.015\alpha$$

なる関係式が成り立つのが更に好適である。前者の場合には、Bi系光導波路の

正味利得において相対利得偏差を25%以下とすることが可能となり、後者の場合には、Bi系光導波路の正味利得において相対利得偏差を19%以下とすることが可能となる。

【0023】

本発明に係る光増幅モジュールは、Bi系光導波路が光ファイバであるのが好適である。この場合には、導波路長を長くすることができ、利得を大きくすることができます。

【0024】

本発明に係る光増幅モジュールでは、励起光供給手段は、中心出力波長が最高出力時に1453nm～1473nmの範囲にある光源を含むのが好適であり、また、中心出力波長が常時1453nm～1473nmの範囲にある光源を含むのが更に好適である。この場合には、Bi系光導波路の励起効率が優れる。

【0025】

本発明に係る光増幅モジュールでは、励起光供給手段は、(1)光反射面と光出射面とを有する半導体発光素子と、(2)半導体発光素子の光出射面より出射された光のうち特定波長の光の一部を反射して、その反射した光を光出射面より半導体発光素子の内部へ入射させる回折格子とを含むのが好適である。また、回折格子は光ファイバ上に形成された光ファイバグレーティングであるのが好適である。この場合には、励起光供給手段より供給される励起光の波長が安定する。

【0026】

本発明に係る光増幅モジュールは、石英系ホストガラスからなり光導波領域にEr元素が添加された石英系光導波路を更に備えるのが好適であり、この場合には、励起効率または雑音特性が改善される。石英系光導波路が多波長信号光の伝送経路上のBi系光導波路の上流に設けられているのが好適であり、この場合には、雑音特性が改善される。石英系光導波路が多波長信号光の伝送経路上のBi系光導波路の下流に設けられているのが好適であり、この場合には、励起効率が改善される。また、石英系光導波路が、Al元素およびLa元素の双方または何れか一方とP元素とが共添加されているのが好適であり、この場合には、Lバンド利得帯域が拡張される。

【0027】

【発明の実施の形態】

以下、添付図面を参照して本発明の実施の形態を詳細に説明する。なお、図面の説明において同一の要素には同一の符号を付し、重複する説明を省略する。

【0028】

図1は、本実施形態に係る光通信システム1の構成図である。この図に示される光通信システム1は、光送信器10、光中継器20、光受信器30および光ファイバ伝送路40, 50を備えている。光送信器10と光中継器20との間に光ファイバ伝送路40が敷設されており、光中継器20と光受信器30との間に光ファイバ伝送路50が敷設されている。

【0029】

光送信器10は、光源部 $1\ 1_{C1} \sim 1\ 1_{C4}$ 、光源部 $1\ 1_{L1} \sim 1\ 1_{L4}$ 、光合波器 $1\ 2_C$ 、光合波器 $1\ 2_L$ 、光增幅装置 $1\ 3_C$ 、光增幅装置 $1\ 3_L$ および光合波器14を備える。光源部 $1\ 1_{C1} \sim 1\ 1_{C4}$ それぞれは、Cバンドに含まれる互いに異なる波長の信号光を出力する。光合波器 $1\ 2_C$ は、光源部 $1\ 1_{C1} \sim 1\ 1_{C4}$ それより出力されたCバンドの各波長の信号光を入力し、これらを合波して出力する。光增幅装置 $1\ 3_C$ は、光合波器 $1\ 2_C$ より合波されて出力されたCバンドの多波長の信号光を入力し、この多波長の信号光を一括光増幅して出力する。光源部 $1\ 1_{L1} \sim 1\ 1_{L4}$ それぞれは、Lバンドに含まれる互いに異なる波長の信号光を出力する。光合波器 $1\ 2_L$ は、光源部 $1\ 1_{L1} \sim 1\ 1_{L4}$ それより出力されたLバンドの各波長の信号光を入力し、これらを合波して出力する。光增幅装置 $1\ 3_L$ は、光合波器 $1\ 2_L$ より合波されて出力されたLバンドの多波長の信号光を入力し、この多波長の信号光を一括光増幅して出力する。そして、光合波器14は、光增幅装置 $1\ 3_C$ より出力されたCバンドの多波長の信号光と、光增幅装置 $1\ 3_L$ より出力されたCバンドの多波長の信号光とを入力し、これらを合波して光ファイバ伝送路40へ送出する。

【0030】

光中継器20は、光分波器21、光合波器23、光增幅装置 $2\ 3_C$ および光增幅装置 $2\ 3_L$ を備える。光分波器21は、光ファイバ伝送路40により伝送され

た到達した多波長の信号光を入力し、その多波長の信号光をCバンドとLバンドとに分波して、Cバンドの多波長の信号光を光増幅装置 23_C へ出力し、Lバンドの多波長の信号光を光増幅装置 23_L へ出力する。光増幅装置 23_C は、光分波器21より出力されたCバンドの多波長の信号光を入力し、この多波長の信号光を一括光増幅して出力する。光増幅装置 23_L は、光分波器21より出力されたLバンドの多波長の信号光を入力し、この多波長の信号光を一括光増幅して出力する。そして、光合波器22は、光増幅装置 23_C より出力されたCバンドの多波長の信号光と、光増幅装置 23_L より出力されたCバンドの多波長の信号光とを入力し、これらを合波して光ファイバ伝送路50へ送出する。

【0031】

光受信器30は、受光部 $31_{C1} \sim 31_{C4}$ 、受光部 $31_{L1} \sim 31_{L4}$ 、光分波器 32_C 、光分波器 32_L 、光増幅装置 33_C 、光増幅装置 33_L および光分波器 34 を備える。光分波器 34 は、光ファイバ伝送路50により伝送された到達した多波長の信号光を入力し、その多波長の信号光をCバンドとLバンドとに分波して、Cバンドの多波長の信号光を光増幅装置 33_C へ出力し、Lバンドの多波長の信号光を光増幅装置 33_L へ出力する。光増幅装置 33_C は、光分波器 34 より出力されたCバンドの多波長の信号光を入力し、この多波長の信号光を一括光増幅して出力する。光分波器 32_C は、光増幅装置 33_C より出力されたCバンドの多波長の信号光を入力し、この多波長の信号光を波長毎に分波して出力する。受光部 $31_{C1} \sim 31_{C4}$ それぞれは、光分波器 32_C により分波されて出力されたCバンドの各波長の信号光を受光して、これを電気信号に変換して出力する。光増幅装置 33_L は、光分波器 34 より出力されたLバンドの多波長の信号光を入力し、この多波長の信号光を一括光増幅して出力する。光分波器 32_L は、光増幅装置 33_L より出力されたLバンドの多波長の信号光を入力し、この多波長の信号光を波長毎に分波して出力する。受光部 $31_{L1} \sim 31_{L4}$ それぞれは、光分波器 32_L により分波されて出力されたLバンドの各波長の信号光を受光して、これを電気信号に変換して出力する。

【0032】

この光通信システム1では、光源部 $11_{C1} \sim 11_{C4}$ より出力されたCバンドの

多波長の信号光は、光送信器10において、光合波器12_Cにより合波され、光増幅装置13_Cにより一括光増幅され、光合波器14を経て、光ファイバ伝送路40へ送出される。光ファイバ伝送路40により伝送されたCバンドの多波長の信号光は、光中継器20において、光分波器21を経て、光増幅装置23_Cにより一括光増幅され、光合波器22を経て、光ファイバ伝送路50へ送出される。光ファイバ伝送路50により伝送されたCバンドの多波長の信号光は、光受信器30において、光分波器34を経て、光増幅装置33_Cにより一括光増幅され、光分波器32_Cにより波長毎に分波され、受光部31_{C1}～31_{C4}により受信される。

【0033】

一方、光源部11_{L1}～11_{L4}より出力されたLバンドの多波長の信号光は、光送信器10において、光合波器12_Lにより合波され、光増幅装置13_Lにより一括光増幅され、光合波器14を経て、光ファイバ伝送路40へ送出される。光ファイバ伝送路40により伝送されたLバンドの多波長の信号光は、光中継器20において、光分波器21を経て、光増幅装置23_Lにより一括光増幅され、光合波器22を経て、光ファイバ伝送路50へ送出される。光ファイバ伝送路50により伝送されたLバンドの多波長の信号光は、光受信器30において、光分波器34を経て、光増幅装置33_Lにより一括光増幅され、光分波器32_Lにより波長毎に分波され、受光部31_{L1}～31_{L4}により受信される。

【0034】

図2は、第1実施形態に係る光増幅装置100の構成図である。この図に示される光増幅装置100は、図1に示された光通信システム1に含まれる光増幅装置13_Lとして好適に用いられるものである。この光増幅装置100は、入力端101から出力端102へ向かって順に、光カプラ111、光アイソレータ121、光カプラ113、Bi系EDF130、光カプラ114、光アイソレータ123、光カプラ112および光損失部品140を備える。また、この光増幅装置100は、光カプラ111に接続された受光素子151、光カプラ112に接続された受光素子152、光カプラ113に接続された励起光源153、光カプラ114に接続された励起光源154、Bi系EDF130に接して又は近傍に設

けられた温度検出素子161および温度調整素子162、ならびに、全体の動作を制御する制御部190を備える。

【0035】

光カプラ111は、入力端101に入力した多波長の信号光を入力して、その多波長の信号光の一部を分岐して受光素子151へ出力し、残部を光アイソレータ121へ出力する。光カプラ112は、光アイソレータ122より到達した多波長の信号光を入力して、その多波長の信号光の一部を分岐して受光素子152へ出力し、残部を光損失部品140へ出力する。受光素子151, 152それぞれは、到達した多波長の信号光を受光して、その光強度に応じた値の電気信号を制御部190へ出力する。

【0036】

光カプラ113は、光アイソレータ121より到達した多波長の信号光をBi系EDF130へ出力するとともに、励起光源153より出力された励起光をもBi系EDF130へ出力する。光カプラ114は、Bi系EDF130より到達した多波長の信号光を光アイソレータ122へ出力するとともに、励起光源154より出力された励起光をBi系EDF130へ出力する。これら光カプラ113, 114および励起光源153, 154は、Bi系EDF130へ励起光を供給する励起光供給手段として作用する。

【0037】

励起光源153, 154それぞれは、Bi系EDF130に添加されたEr元素を励起するための励起光を出力するものであり、例えば、半導体レーザ光源が好適に用いられる。また、励起光源153, 154それぞれは、中心出力波長が最高出力時に1453nm～1473nmの範囲にあるのが好適であり、また、中心出力波長が常時1453nm～1473nmの範囲にあるのが更に好適である。このような波長の励起光が用いられることにより、Bi系EDF130における信号光增幅の効率が優れたものとなる。

【0038】

また、励起光源153, 154それぞれは、光反射面と光出射面とを有するレーザダイオードと、このレーザダイオードの光出射面より出射された光のうち特

定波長の光の一部を反射して光出射面よりレーザダイオードの内部へ入射させる回折格子とを含むのが好適であり、また、この回折格子が光ファイバ上に形成された光ファイバグレーティングであるのが好適である。このように構成される励起光源153, 154それぞれは、出力波長が安定したものとなる。

【0039】

光アイソレータ121, 122それぞれは、入力端101から出力端102へ向かう順方向に光を通過させるが、逆方向には光を通過させない。

【0040】

Bi 系EDF130は、酸化 Bi 系ホストガラスからなり、その光導波領域に Er 元素が添加されている光ファイバである。なお、光ファイバではなく平面光導波路の形態のものであってもよいが、Lバンド用途では大きな吸収条長積が必要であるので、導波路長を確保し易い光ファイバの形態が好適である。この Bi 系EDF130は、励起光源153, 154より出力された励起光が供給されることにより反転分布が生じて、波長1610nm以上の波長域を含む信号光波長帯域の多波長の信号光を一括光増幅することができる。

【0041】

光損失部品140は、可変の損失特性を有しており、 Bi 系EDF130により一括光増幅された多波長の信号光を入力して、その多波長信号光に対して損失を与えて出力する。この光損失部品140は、可変光減衰器であってもよいし、また、波長によって損失が異なるものであってもよい。

【0042】

温度検出素子161は、 Bi 系EDF130に接して又は近傍に設けられており、 Bi 系EDF130またはその近傍の温度を検出するものであり、例えばサーミスタが好適に用いられる。温度調整素子162は、 Bi 系EDF130に接して又は近傍に設けられており、 Bi 系EDF130またはその近傍の温度を調整するものであり、例えばペルチエ素子やヒータが好適に用いられる。

【0043】

制御部190は、光増幅装置100の全体の動作を制御する。制御部190は、受光素子151, 152それより出力された電気信号を入力して、 Bi 系

EDF130へ入力する信号光のパワーを検知するとともに、Bi系EDF130より出力された信号光のパワーを検知し、また、これら入力信号光パワーおよび出力信号光パワーに基づいてBi系EDF130における信号光増幅の利得を求める。また、制御部190は、温度検出素子161により検出されたBi系EDF130またはその近傍の温度を得る。そして、制御部190は、これらに基づいて、励起光源153、154それぞれより出力される励起光のパワーを制御し、温度調整素子162によるBi系EDF130またはその近傍の温度調整を制御し、また、光損失部品140の損失特性を制御する。

【0044】

この光増幅装置100の概略動作は以下のとおりである。励起光源153、154より出力された励起光源は、光カプラ113、114を経て、Bi系EDF130へ供給される。入力端101に入力したLバンドの多波長の信号光は、光カプラ111、光アイソレータ121および光カプラ113を経てBi系EDF130に入力して、このBi系EDF130において一括光増幅される。Bi系EDF130において光増幅された多波長の信号光は、光カプラ114、光アイソレータ123および光カプラ112を経て光損失部品140へ入力して、この光損失部品140において所定の損失を被る。そして、光損失部品140より出力された多波長の信号光は、出力端102より出力される。

【0045】

この光増幅装置100に含まれるBi系EDF130における信号光増幅動作は以下のように行われるのが好適である。すなわち、何れかの動作温度において、Bi系EDF130の正味利得スペクトルが最も平坦となるように励起光供給手段によりBi系EDF130に供給される励起光のパワーを調整して反転分布を調整したときに、Bi系EDF130の正味利得スペクトルにおける相対利得偏差が25%未満であるのが好適であり、この相対利得偏差が19%未満であるのが更に好適である。

【0046】

また、全動作温度範囲内において、Bi系EDF130の正味利得スペクトルが最も平坦となるように励起光供給手段によりBi系EDF130に供給される

励起光のパワーを調整して反転分布を調整したときに、Bi系EDF130の正味利得スペクトルにおける相対利得偏差が25%未満であるのが好適であり、この相対利得偏差が19%未満であるのが更に好適である。

【0047】

また、全動作温度範囲内において、Bi系EDF130の正味利得スペクトルが最も平坦となるように励起光供給手段によりBi系EDF130に供給される励起光のパワーを調整して反転分布を調整したときに、Bi系EDF130の正味利得スペクトルにおける相対利得偏差が25%未満となる波長帯域幅が37nmを超えるのが好適であり、この波長帯域幅が50nmを超えるのが更に好適である。

【0048】

また、全動作温度範囲内において、Bi系EDF130の正味利得スペクトルが最も平坦となるように励起光供給手段によりBi系EDF130に供給される励起光のパワーを調整して反転分布を調整したときに、Bi系EDF130の正味利得スペクトルにおける相対利得偏差が19%未満となる波長帯域幅が37nmを超えるのが好適であり、この波長帯域幅が50nmを超えるのが更に好適である。

【0049】

図3は、第2実施形態に係る光増幅装置200の構成図である。この図に示される光増幅装置200は、図1に示された光通信システム1に含まれる光増幅装置23L, 33Lとして好適に用いられるものである。この光増幅装置200は、入力端201から出力端202へ向かって順に、光カプラ211、光アイソレータ221、光カプラ213、Bi系EDF231、光アイソレータ222、分散補償光ファイバ270、光アイソレータ223、光カプラ214、Bi系EDF232、石英系EDF233、光カプラ215、光アイソレータ224、光カプラ212および光損失部品240を備える。また、この光増幅装置200は、光カプラ211に接続された受光素子251、光カプラ212に接続された受光素子252、光カプラ213に接続された励起光源253、光カプラ214に接続された励起光源254、光カプラ215に接続された励起光源255、Bi系E

D F 2 3 1に接して又は近傍に設けられた温度検出素子2 6 1および温度調整素子2 6 4、Bi系E D F 2 3 2に接して又は近傍に設けられた温度検出素子2 6 2および温度調整素子2 6 5、石英系E D F 2 3 3に接して又は近傍に設けられた温度検出素子2 6 3および温度調整素子2 6 6、ならびに、全体の動作を制御する制御部2 9 0を備える。

【0050】

光カプラ2 1 1は、入力端2 0 1に入力した多波長の信号光を入力して、その多波長の信号光の一部を分岐して受光素子2 5 1へ出力し、残部を光アイソレータ2 2 1へ出力する。光カプラ2 1 2は、光アイソレータ2 2 4より到達した多波長の信号光を入力して、その多波長の信号光の一部を分岐して受光素子2 5 2へ出力し、残部を光損失部品2 4 0へ出力する。受光素子2 5 1, 2 5 2それぞれは、到達した多波長の信号光を受光して、その光強度に応じた値の電気信号を制御部2 9 0へ出力する。

【0051】

光カプラ2 1 3は、光アイソレータ2 2 1より到達した多波長の信号光をBi系E D F 2 3 1へ出力するとともに、励起光源2 5 3より出力された励起光をもBi系E D F 2 3 1へ出力する。光カプラ2 1 4は、光アイソレータ2 2 3より到達した多波長の信号光をBi系E D F 2 3 2へ出力するとともに、励起光源2 5 4より出力された励起光をもBi系E D F 2 3 2へ出力する。光カプラ2 1 5は、石英系E D F 2 3 3より到達した多波長の信号光を光アイソレータ2 2 4へ出力するとともに、励起光源2 5 5より出力された励起光を石英系E D F 2 3 3へ出力する。光カプラ2 1 3および励起光源2 5 3は、Bi系E D F 2 3 1へ励起光を供給する励起光供給手段として作用する。光カプラ2 1 4, 2 1 5および励起光源2 5 4, 2 5 5は、Bi系E D F 2 3 2および石英系E D F 2 3 3へ励起光を供給する励起光供給手段として作用する。

【0052】

励起光源2 5 3～2 5 5それは、Bi系E D F 2 3 1, 2 3 2または石英系E D F 2 3 3に添加されたE r元素を励起するための励起光を出力するものであり、例えば、半導体レーザ光源が好適に用いられる。また、励起光源2 5 3,

254 それぞれは、中心出力波長が最高出力時に1453nm～1473nmの範囲にあるのが好適であり、また、中心出力波長が常時1453nm～1473nmの範囲にあるのが更に好適である。このような波長の励起光が用いられることにより、Bi系EDF231, 232における信号光増幅の効率が優れたものとなる。

【0053】

また、励起光源253～255それぞれは、光反射面と光出射面とを有するレーザダイオードと、このレーザダイオードの光出射面より出射された光のうち特定波長の光の一部を反射して光出射面よりレーザダイオードの内部へ入射させる回折格子とを含むのが好適であり、また、この回折格子が光ファイバ上に形成された光ファイバグレーティングであるのが好適である。このように構成される励起光源253～255それぞれは、出力波長が安定したものとなる。

【0054】

光アイソレータ221～224それぞれは、入力端201から出力端202へ向かう順方向に光を通過させるが、逆方向には光を通過させない。

【0055】

Bi系EDF231, 232それぞれは、酸化Bi系ホストガラスからなり、その光導波領域にEr元素が添加されている光ファイバである。このBi系EDF231, 232は、励起光源253, 254より出力された励起光が供給されることにより反転分布が生じて、波長1610nm以上の波長域を含む信号光波長帯域の多波長の信号光を一括光増幅することができる。

【0056】

石英系EDF233は、石英系ホストガラスからなり、その光導波領域にEr元素が添加されている光ファイバである。この石英系EDF233は、励起光源255より出力された励起光が供給されることにより反転分布が生じて、多波長の信号光を一括光増幅することができる。石英系EDF233は、図示のとおりBi系EDF233の下流に設けられているのが好適であり、この場合には励起効率が優れる。また、石英系EDF233は、Bi系EDF232の上流に設けられているのも好適であり、この場合には雑音特性が優れる。また、石英系ED

F233は、Al元素およびLa元素の双方または何れか一方とP元素とが共添加されているのが好適である。

【0057】

光損失部品240は、可変の損失特性を有しており、Bi系EDF231, 232および石英系EDF233により一括光増幅された多波長の信号光を入力して、その多波長信号光に対して損失を与えて出力する。この光損失部品240は、可変光減衰器であってもよいし、また、波長によって損失が異なるものであってもよい。

【0058】

温度検出素子261は、Bi系EDF231に接して又は近傍に設けられており、Bi系EDF231またはその近傍の温度を検出する。温度検出素子262は、Bi系EDF232に接して又は近傍に設けられており、Bi系EDF232またはその近傍の温度を検出する。温度検出素子263は、石英系EDF233に接して又は近傍に設けられており、石英系EDF233またはその近傍の温度を検出する。温度検出素子261～263それぞれは、例えばサーミスタが好適に用いられる。

【0059】

温度調整素子264は、Bi系EDF231に接して又は近傍に設けられており、Bi系EDF231またはその近傍の温度を調整する。温度調整素子265は、Bi系EDF232に接して又は近傍に設けられており、Bi系EDF232またはその近傍の温度を調整する。温度調整素子266は、石英系EDF233に接して又は近傍に設けられており、石英系EDF233またはその近傍の温度を調整する。温度調整素子264～266それぞれは、例えばペルチエ素子やヒータが好適に用いられる。

【0060】

分散補償光ファイバ270は、信号光波長帯域において負の波長分散を有しており、光ファイバ伝送路40または50の正の波長分散を補償するものである。

【0061】

制御部290は、光増幅装置200の全体の動作を制御する。制御部290は

、受光素子251, 252それより出力された電気信号を入力して、Bi系EDF231へ入力する信号光のパワーを検知するとともに、石英系EDF233より出力された信号光のパワーを検知し、また、これら入力信号光パワーおよび出力信号光パワーに基づいてBi系EDF231, 232および石英系EDF233における信号光増幅の利得を求める。また、制御部290は、温度検出素子261により検出されたBi系EDF231またはその近傍の温度、温度検出素子262により検出されたBi系EDF232またはその近傍の温度、および、温度検出素子263により検出された石英系EDF233またはその近傍の温度を得る。そして、制御部290は、これらに基づいて、励起光源253, 254それより出力される励起光のパワーを制御し、温度調整素子264によるBi系EDF231またはその近傍の温度調整を制御し、温度調整素子265によるBi系EDF232またはその近傍の温度調整を制御し、温度調整素子266による石英系EDF233またはその近傍の温度調整を制御し、また、光損失部品240の損失特性を制御する。

【0062】

この光増幅装置200の概略動作は以下のとおりである。励起光源253～255より出力された励起光源は、光カプラ213～215を経て、Bi系EDF231, 232および石英系EDF233へ供給される。入力端201に入力したLバンドの多波長の信号光は、光カプラ211、光アイソレータ221および光カプラ213を経て、Bi系EDF231に入力して、このBi系EDF231において一括光増幅される。Bi系EDF231において光増幅された多波長の信号光は、光アイソレータ222を経て、分散補償光ファイバ270に入力して、この分散補償光ファイバ270により分散補償される。分散補償光ファイバ270により分散補償された多波長の信号光は、光アイソレータ223および光カプラ214を経て、Bi系EDF232および石英系EDF233に順次に入力して、これらBi系EDF232および石英系EDF233において一括光増幅される。この光増幅された多波長の信号光は、光カプラ215、光アイソレータ224および光カプラ212を経て光損失部品240へ入力して、この光損失部品240において所定の損失を被る。そして、光損失部品240より出力され

た多波長の信号光は、出力端202より出力される。

【0063】

この光増幅装置200に含まれるBi系EDF231, 232における信号光増幅動作は以下のように行われるのが好適である。すなわち、何れかの動作温度において、Bi系EDF231, 232の正味利得スペクトルが最も平坦となるように励起光供給手段によりBi系EDF231, 232に供給される励起光のパワーを調整して反転分布を調整したときに、Bi系EDF231, 232の正味利得スペクトルにおける相対利得偏差が25%未満であるのが好適であり、この相対利得偏差が19%未満であるのが更に好適である。

【0064】

また、全動作温度範囲内において、Bi系EDF231, 232の正味利得スペクトルが最も平坦となるように励起光供給手段によりBi系EDF231, 232に供給される励起光のパワーを調整して反転分布を調整したときに、Bi系EDF231, 232の正味利得スペクトルにおける相対利得偏差が25%未満であるのが好適であり、この相対利得偏差が19%未満であるのが更に好適である。

【0065】

また、全動作温度範囲内において、Bi系EDF231, 232の正味利得スペクトルが最も平坦となるように励起光供給手段によりBi系EDF231, 232に供給される励起光のパワーを調整して反転分布を調整したときに、Bi系EDF231, 232の正味利得スペクトルにおける相対利得偏差が25%未満となる波長帯域幅が37nmを超えるのが好適であり、この波長帯域幅が50nmを超えるのが更に好適である。

【0066】

また、全動作温度範囲内において、Bi系EDF231, 232の正味利得スペクトルが最も平坦となるように励起光供給手段によりBi系EDF231, 232に供給される励起光のパワーを調整して反転分布を調整したときに、Bi系EDF231, 232の正味利得スペクトルにおける相対利得偏差が19%未満となる波長帯域幅が37nmを超えるのが好適であり、この波長帯域幅が50nm

mを超えるのが更に好適である。

【0067】

次に、光増幅装置100, 200に含まれるBi系EDF130, 231, 232について更に詳細に説明する。

【0068】

図4は、Bi系EDFの利得スペクトルを示す図である。ここで用いたBi系EDFは、Er元素による吸収条長積ピークが約300dBであり、長さが約2mであり、石英系光ファイバとの融着接続損失を含む背景損失が1.6dB程度であった。また、光増幅するべき多波長の信号光を入力させる替わりに、少数波長の主信号で模擬するポンプ・プローブ法を用いた。トータル入力信号光パワーが0dBmであり、波長1.48μm帯の励起光がBi系EDFへ双方向より供給された。

【0069】

この図には、Bi系EDFへ供給される励起光のパワーを調整して得られた室温における4種類の反転分布1～4それぞれの場合について利得スペクトルが示されている。この図に示された4つの反転分布1～4のうち、反転分布3は、順方向励起光パワーが105mWであり、逆方向励起光パワーが32mWであるときに得られた。この反転分布3でLバンドにおいて最も良好な利得平坦度が得られた。

【0070】

この反転分布3のときに、Bi系EDFの両端に接続された石英系光ファイバの間の正味利得において、相対利得偏差は14%であり、実効的信号波長域が1563nm～1615nmであり、実効的信号波長域の帯域幅が52nmであり、実効的信号波長域の利得極小値が11.8dBであった。このBi系EDFの相対利得偏差は、高濃度のAl元素が添加されたCバンド用石英系EDFの相対利得偏差と同程度であった。このBi系EDFの実効的信号波長域の帯域幅は、高濃度のAl元素が添加されたCバンド用石英系EDFの帯域幅(37nm)を大きく上回るものであった。また、このBi系EDFは、石英系光ファイバとの融着接続損失を含む背景損失が1.6dB程度であるので、Bi系EDF単体で

あれば相対利得偏差は更に1.6%程度改善される。

【0071】

図5は、Bi系EDFの利得スペクトルを示す図である。ここでは、陸上幹線系の光通信システムで一般に要求される動作温度範囲内の0°C, 25°Cおよび65それぞれにおいて2つの利得極大値が一致するように反転分布が調整された。同図(b)は、同図(a)の縦軸を拡大したものであり、各温度において利得極小値を基準として利得偏差が縦軸に示されている。

【0072】

この図に示されるように、温度が高いほど利得は小さい。それ故、所望の利得平坦度を得るために必要なBi系EDFの吸収条長積ピークを求める際に、使用時の温度を規定することが重要である。また、同図(b)に示されるように、各温度の利得スペクトルの形状は実効的信号波長域1563nm~1615nmにおいて略一定であり、また、各温度で実効的信号波長域も略一定である。温度が高いほど利得極小値が小さく、その一方で、各温度で利得偏差が略一定であるので、温度が高いほど相対利得偏差は劣化する。しかし、温度65°Cにおいても相対利得偏差は15%（背景損失を除くと14%）であり、これは、Al元素が添加されたCバンド用石英系EDFの相対利得偏差より良好である。

【0073】

同図(a)から読み取れるように、室温時において吸収条長積ピークが275dBであるBi系EDFを用いた光増幅装置は、実効的信号波長域内の利得極小値 G_{min} (dB)と温度T(°C)との間に

$$G_{min} = -0.049T + 14.6 \quad \cdots (1)$$

なる関係式がある。

【0074】

また、均一広がり近似から、吸収条長積と利得極小値 G_{min} とは互いに比例関係にあるので、或る動作温度T(°C)においてBi系EDFを用いて所望の利得 G_x (dB)を得たい場合には、

$$\alpha_T = 6122G_x / (298 - T) \quad \cdots (2)$$

なる式で与えられる吸収条長積ピーク α_T (dB)を有するBi系EDFを用い

れば、上記の実効的信号波長域 1563 nm～1615 nmにおいて平坦化された利得スペクトルを実現することができる。

【0075】

なお、厳密には、上記の所望の利得 G_x には Bi 系 EDF 自体の背景損失と融着接続損失とを加えるべきである。例えば、動作温度 25°Cにおいて、Bi 系 EDF の両端に接続された石英系光ファイバの間で 25 dB の正味利得を L バンドで得るには、背景損失と融着接続損失との合計値が 1 dB であるとすると、

$$G_x = 25 + 1 \quad \cdots (3)$$

とする必要がある。この所望の利得 G_x の値と動作温度 T の値 25°C を上記(2) 式に代入すると、必要な吸収条長積ピーク α_T は 5.80 dB 程度であることが判る。

【0076】

また、特に L バンド用の場合、Bi 系 EDF が長すぎると 1 連長では励起光が Bi 系 EDF に行き渡らない事態も生じ得るので、Bi 系 EDF を多段に構成して、各段の Bi 系 EDF に励起光を供給するのが好適である。

【0077】

また、上述したとおり、所望の利得平坦度を得るために必要な Bi 系 EDF の吸収条長積ピークを求める際に、使用時の温度を規定することが重要である。すなわち、動作温度を規定せずに Bi 系 EDF の利得平坦度を検討することは無意味である。そこで、図 2, 3 に示された光増幅装置 100, 200 では、温度検出素子により各 Bi 系 EDF またはその近傍の温度を検出し、温度調整素子により各 Bi 系 EDF またはその近傍の温度を目標設定温度に調整している。この場合、温度調整素子（例えばペルチ工素子やヒータ）の消費電力を抑制するために、目標設定温度は、光増幅装置が運用される典型的な動作温度範囲（陸上光通信システムの場合には室温～40°C、海底光通信システムの場合には0°C～10°C程度）とするのが好適である。

【0078】

ただし、温度調整素子は一般に消費電力が大きく、また、周囲の環境に温度調整は大きく影響されるので、様々な使用環境を考慮すると高精度の温度制御は容

易ではない。Bi系EDFの動作温度範囲が比較的広いと、利得平坦度の劣化につながる。そこで、以下に説明するような対処を行うのが好適である。

【0079】

図5(b)から読み取れるように、実効的信号波長域内の利得極小値 G_{min} (dB)の変化量 ΔG_{min} (dB)と温度変化 ΔT (℃)との間に、

$$0.0036 \Delta T = \Delta G_{min} / G_{min}^* \quad \dots(4)$$

なる関係式がある。ここで、 G_{min}^* は、温度25℃における利得極小値 G_{min} である。上記の係数0.0036は、石英系EDFの場合の係数0.0026より大きい。この関係式を用いて以下のようないくつかの対処法を採用する。

【0080】

第1の対処法は、図2, 3に示された光増幅装置100, 200において、温度検出素子により各Bi系EDFの温度Tを検出し、温度変化 ΔT に基づいて光損失部品140, 240の損失特性（光減衰量または損失スペクトル）を調整することで、温度変化 ΔT により生じた利得偏差を補償するものである。光損失部品140, 240として可変光減衰器が用いられる場合、上記(3)式の関係を利用して、その可変光減衰器における光減衰量の変化量 ΔA と、Bi系EDFの温度変化量 ΔT との間に、実効的に

$$\Delta A = -C_1 \Delta T \quad \dots(5)$$

なる関係式が成り立つとして、可変光減衰器における光減衰量の変化量 ΔA を求める。ここで、 C_1 は正の定数である。そして、可変光減衰器における光減衰量は、この変化量 ΔA だけ調整される。なお、このような計算式を用いるのではなく、光増幅装置の運用開始前に、可変光減衰器における光減衰量とBi系EDFの温度Tとの間の関係を実測し、その関係を制御部190, 290内のメモリに記憶しておいて、これに基づいて制御を行ってもよい。

【0081】

第2の対処法は、図2, 3に示された光増幅装置100, 200において、フィードバック制御またはフィードフォワード制御により温度調整素子により各Bi系EDFの温度を能動的に制御するものである。利得変化量 ΔG とBi系EDFの温度変化量 ΔT との間の関係は、上記(3)式の関係を利用して、

$$\Delta G = -C_2 \Delta T \quad \cdots (6)$$

なる式で与えられる。ここで、 C_2 は正の定数である。そして、各B i系EDFの温度は、この変化量 ΔT だけ温度調整素子により調整される。なお、このような計算式を用いるのではなく、光増幅装置の運用開始前に、利得GとB i系EDFの温度Tとの間の関係を実測し、その関係を制御部190, 290内のメモリに記憶しておいて、これに基づいて制御を行ってもよい。

【0082】

利得変化 ΔG は、光増幅装置100の受光素子151, 152または光増幅装置200の受光素子251, 252による入力信号光パワーおよび出力信号光パワーの検出に基づいて得られる。或いは、利得変化 ΔG は、光通信システムの上位監視網から送られて来た所望の利得（多くの場合、敷設された光ファイバ伝送路の損失と一致）の情報に基づいて決定されてもよい。

【0083】

なお、上記の第1の対処法および第2の対処法は、温度調整素子による各B i系EDFの温度を一定値に制御する方法と併用されてもよい。例えば、常時は温度調整素子による各B i系EDFの温度を一定値に制御する方法が採用され、温度制御素子が故障したときに第1の対処法が採用されるのが好適である。このようにすることで、光通信システム1の信頼性は更に向上する。

【0084】

また、これらの対処法を採用して利得極小値の変動を補償したとしても、図5(b)から判るように、利得スペクトルの形状は温度によって僅かに異なっている。実効的信号波長域における利得偏差は、温度65°Cのときと比べて、温度0°Cのときには0.2dB～0.3dB程度大きい。図5では実効的信号波長域における利得極小値が10dB程度であるが、仮に実効的信号波長域における利得極小値が20dBであると、実効的信号波長域における利得偏差は、温度65°Cのときと温度0°Cのときとでは0.4dB～0.6dBもの差が生じて、実用上無視し得ない。

【0085】

このような事態に対処するには、光損失部品の損失スペクトルを、動作温度範

囲の中心温度または典型温度における Bi 系 EDF の利得スペクトルと同一形状のものとするのが好適である。この場合には、温度変化により利得偏差が生じるが、これによる利得偏差は小さく抑えられる。

【0086】

或いは、温度変化により生じる利得偏差は実効的信号波長域において略定数倍に変化するので、このように調整が可能な損失スペクトルを有する光損失部品を用いるのが好適である。このような光損失部品は、例えば、マッハツエンダ干渉計の構成を有していて、一方の光路上に動作温度範囲の下限値での利得スペクトルと同一形状の損失スペクトルを有する利得等化器が設けられ、他方の光路が単なるバイパスとなっているものが好適である。

【0087】

また、図3に示された光増幅装置200の如く Bi 系 EDF 231, 232に加えて石英系 EDF 233においても信号光を光増幅する場合、上記の第1の対処法を採用する際には、Bi 系 EDF と石英系 EDF とでは、温度依存性が相違しているので、別個に温度検出素子を設けるのが好適である。また、上記の第2の対象負尾を採用する際には、石英系 EDF より Bi 系 EDF の方が僅かな温度変化でも利得を効率よく調整することができるので、石英系 EDF より Bi 系 EDF の方が長いのが好適である。

【0088】

上記(3)式で説明したとおり、Bi 系 EDF における Er 遷移に因る利得スペクトルが平坦であっても、背景損失が大きければ、Bi 系 EDF の正味利得の相対利得偏差は劣化する。図6は、Bi 系 EDF の正味利得の相対利得偏差と背景損失との関係を説明する図である。この図に示されるように、Bi 系 EDF の正味の利得スペクトルは、Er 遷移に因る利得スペクトルから、背景損失を減じたものである。利得最大値と利得極小値との差 ΔG が変化しないものの、Bi 系 EDF の正味の利得スペクトルの利得極小値 G_b は、Er 遷移に因る利得スペクトルの利得極小値 G_b より小さい。このことから、背景損失が大きいほど、Bi 系 EDF の正味利得の相対利得偏差は劣化する。図4および図5に利得スペクトルが示された Bi 系 EDF は、特に背景損失が小さいことから、正味利得としても

相対利得偏差は小さい。しかし、典型的にはB_i系EDFの背景損失は2dB/m程度である。

【0089】

以下では説明の簡便化の為に室温化での動作について説明する。B_i系EDFの背景損失 α_B (dB/m)の許容値と、E_r本来の吸収ピーク α (dB/m)との間には、

$$(0.12 \times 0.042 \times \alpha) / (0.042 \times \alpha - \alpha_B)$$

$$\leq \text{正味利得の相対利得偏差} \quad \cdots (7)$$

なる関係式が成り立つ。ここで、定数値0.12は、図4に示された反転分布3の際の利得スペクトルから実測された背景損失が無いとした場合の相対利得偏差である。また、定数値0.042は、上記(2)式に温度Tとして陸上システムでの典型的動作温度40°Cを代入して得られる利得G_xと吸収ピークとの比率である。相対利得偏差の目標値については、既述したとおり、19%を超えると、Cバンド用石英系EDFと同等のレベルダイアグラム設計ができなくなり、25%を超えると、P/A1共添加石英系EDFに対する優位性を失う。それ故、相対利得偏差の目標値は、25%以上であるのが好適であり、19%以上であるのが更に好適である。

【0090】

そこで、上記(7)式の右辺の正味利得の相対利得偏差を25%または19%とすると、上記(7)式より、

$$\alpha_B \leq 0.021 \alpha \quad \cdots (8a)$$

または、

$$\alpha_B \leq 0.015 \alpha \quad \cdots (8b)$$

なる関係式が得られる。上述したとおり、典型的にはB_i系EDFの背景損失 α_B は2dB/m程度であるので、E_r本来の吸収ピーク α は、95dB/m以上であるのが好適であり、143dB/m以上であるのが更に好適である。なお、上記(8a)式および(8b)式それぞれの右辺の係数は、想定される動作温度に応じて異なる場合があり得る。動作温度が低いと、これらの係数は大きくなる。

【0091】

B_i系EDFの蛍光特性は石英系EDFの蛍光特性と異なることが知られている。特に、B_i系EDFの場合に波長1480nm付近に見られる蛍光特性の膨らみは、石英系EDFの場合には見られない特徴である。この特徴は、B_i系EDF中のB元素の組成量が多いときに顕著である。また、蛍光特性と吸収特性との間には相関があるので、B_i系EDFの場合には波長1480nm付近に吸収ピークがある筈である。

【0092】

Cバンドの信号光を光増幅する場合には、波長1.48μm帯の励起光の吸収効率が高いことは、励起効率の改善につながるので望ましい。しかし、Lバンドの信号光を光増幅する場合には、使用する吸収条長積ピークが大きいので、励起光の吸収が信号光の利得と比較して大きすぎると、励起効率や雑音指数の劣化につながる。そこで、B_i系EDFを用いてLバンドの信号光を光増幅する場合には、励起光波長は1.48μmより短波長であるのが好ましい。

【0093】

図7は、励起光波長と利得との関係を示すグラフである。ここでは、図4および図5で説明したB_i系EDFを用いて、このB_i系EDFに対して双方向より各50mWの励起光を供給した。入力信号光は、波長が1565nmであり、パワーが-35dBmであった。励起光波長は、1450nm～1500nmの範囲で変化させた。この図から判るように、励起光波長が1460nm付近であるときに、利得は大きい。最も望ましい励起光波長は1463nm程度である。

【0094】

ただし、最も望ましい励起光波長より実際の励起光波長がずれていたとしても、挿入損失が小さい光部品を用いることで、この波長ずれに因る悪影響を回復することができる。図2に示されるようにB_i系EDFが1段のみ用いられる場合には、典型的には、B_i系EDFの入力側および出力側それぞれに、モニタ用光カプラ、光アイソレータおよび励起光供給用光カプラが挿入される。これら個々の光部品につき、典型値より挿入損失を0.2dB程度まで低減することができる。したがって、励起光波長に対する許容範囲は、図7に示された利得ピーク波長を中心波長として、その利得ピークより1.2dB程度小さい利得となる波長

範囲、すなわち、 $\pm 10\text{ nm}$ 程度の波長範囲となる。励起光波長の安定化の為には、レーザダイオードと共振グレーティングとの組合せからなる励起光源を用いるのが好適であり、また、共振グレーティングとして光ファイバに形成されたグレーティングを用いるのが安価であり好適である。

【0095】

図8は、信号光波長と雑音指数との関係を示すグラフである。このグラフには、Bi系EDF、P/A1共添加石英系EDFおよびP共添加石英系EDFそれぞれについて、雑音指数特性が示されている。各EDFへのトータル入力信号光パワーは0dBmであった。Bi系EDFは、図4および図5で説明したものであり、双方向より各60mWの励起光を供給した。P/A1共添加石英系EDFは、双方向より各27mWの励起光を供給した。P共添加石英系EDFは、順方向より100mWの励起光を供給した。

【0096】

このグラフから判るように、P/A1共添加石英系EDFと比較すると、Bi系EDFの雑音指数は、短波長側で劣っており、波長1565nm付近では1dB以上劣っている。これは、Bi系EDFの内部の背景損失や石英系光ファイバとの融着接続損失が高いことに因る。更に、濃度消光の影響も懸念される。このように、石英系EDFと比較すると、Bi系EDFは、雑音指数や励起効率の点で劣っている。

【0097】

このような事情を考慮すると、雑音指数を改善するには、石英系EDFは、光増幅装置の入力端付近や、分散補償光ファイバ等の大きな挿入損失を有する光部品の直後に、設けられるのが好適である。また、励起効率を改善するには、石英系EDFは、光増幅装置の出力端付近や、分散補償光ファイバ等の大きな挿入損失を有する光部品の直前に、設けられるのが好適である。

【0098】

ただし、一般に用いられているA1共添加石英系EDFは、波長1600nmより長波長側で利得が急激に低下するので、Bi系EDFの特徴である広帯域で平坦な利得スペクトルを損なうことになる。そこで、長波長側でも利得を有する

P/A1共添加石英系EDFを用いるのが好適である。

【0099】

また、既述したとおり、P/A1共添加石英系EDFの相対利得偏差は大きく、この点でP/A1共添加石英系EDF単体では実用上問題がある。そこで、P/A1共添加石英系EDFとBi系EDFとを組み合わせて用いるのが好適である。なお、石英系EDFの添加物としては、P元素に加えて、Al元素およびLa元素の何れかが添加されているのが好ましい。仮に、Al元素およびLa元素の何れも添加されていないと、図8に示されるとおり、100mW順方向励起の場合であっても、雑音指数が顕著に悪くなる。

【0100】

なお、P/A1共添加石英系EDFの利得スペクトルと同等の利得スペクトルは、波長0.98μm帯の励起光への感度を向上させる働きを有するYb元素を更に共添加することでも実現できる。Yb共添加は、特にクラッド励起などの場合のように、大出力励起レーザを使用するときに好適である。

【0101】

以上のように、本実施形態に係る光増幅装置100, 200は、Bi系EDFを光増幅媒体として用いることにより、熱損傷や毒性の問題が無く実用的であり、また、Lバンドにおいて広帯域の実効的信号波長域で小さい相対利得偏差を有することができる。この光増幅装置100, 200を含む光通信システム1は、Lバンドを用いて大容量の情報を送受信することができる。本実施形態に係る光増幅装置100, 200は、特にBi系EDFの反転分布、温度および吸収条長積ピークを最適化することにより、広帯域の実効的信号波長域で小さい相対利得偏差を確実に実現することができる。本実施形態に係る光増幅装置100, 200は、励起光波長を最適化することにより、励起効率を高くすることができる。また、Bi系EDFに加えてP/A1共添加石英系EDFをも用いることにより、雑音特性が優れたものとなる。

【0102】

本発明は、上記実施形態に限定されるものではなく種々の変形が可能である。例えば、光ファイバ伝送路や分散補償光ファイバにおいて多波長信号光をラマン

増幅してもよく、この場合には、雑音特性が更に改善され得る。

【0103】

【発明の効果】

以上、詳細に説明したとおり、本発明によれば、Bi系光導波路を光増幅媒体として用いることにより、熱損傷や毒性の問題が無く実用的であり、また、Lバンドにおいて広帯域の実効的信号波長域で小さい相対利得偏差を有することができる。

【図面の簡単な説明】

【図1】

本実施形態に係る光通信システム1の構成図である。

【図2】

第1実施形態に係る光増幅装置100の構成図である。

【図3】

第2実施形態に係る光増幅装置200の構成図である。

【図4】

Bi系EDFの利得スペクトルを示す図である。

【図5】

Bi系EDFの利得スペクトルを示す図である。

【図6】

Bi系EDFの正味利得の相対利得偏差と背景損失との関係を説明する図である。

【図7】

励起光波長と利得との関係を示すグラフである。

【図8】

信号光波長と雑音指数との関係を示すグラフである。

【図9】

EDFの相対利得偏差の説明図である。

【図10】

A1共添加石英系EDFの利得スペクトルを示す図である。

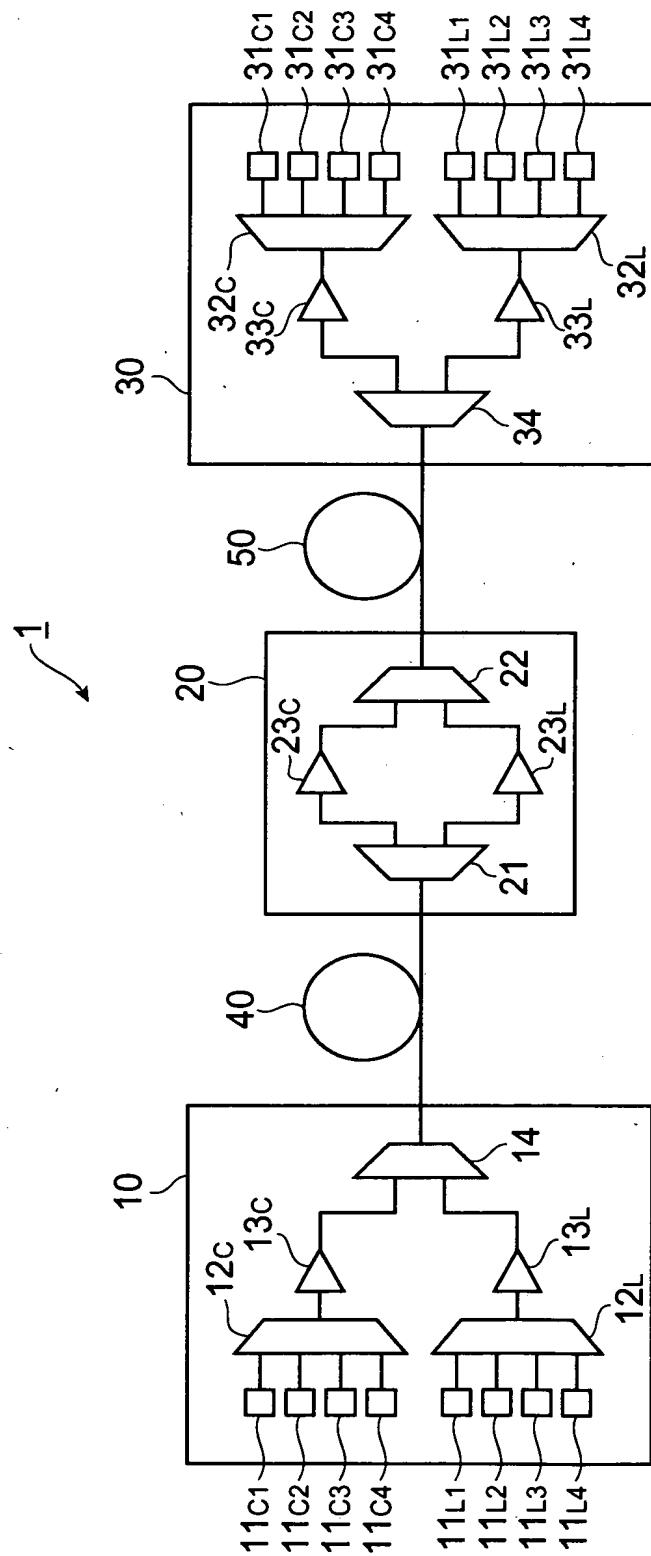
【符号の説明】

1 …光通信システム、10…光送信器、11…光源部、12…光合波器、13…光増幅装置、14…光合波器、20…光中継器、21…光分波器、22…光増幅装置、23…光合波器、30…光受信器、31…受光部、32…光分波器、33…光増幅装置、34…光分波器、40, 50…光ファイバ伝送路、100…光増幅装置、111～114…光カプラ、121, 122…光アイソレータ、130…Bi系EDF、140…光損失部品、151, 152…受光素子、153, 154…励起光源、161…温度検出素子、162…温度調整素子、190…制御部、200…光増幅装置、211～215…光カプラ、221～224…光アイソレータ、231, 232…Bi系EDF、233…石英系EDF、240…光損失部品、251, 252…受光素子、253～255…励起光源、261～263…温度検出素子、264～266…温度調整素子、270…分散補償光ファイバ、290…制御部。

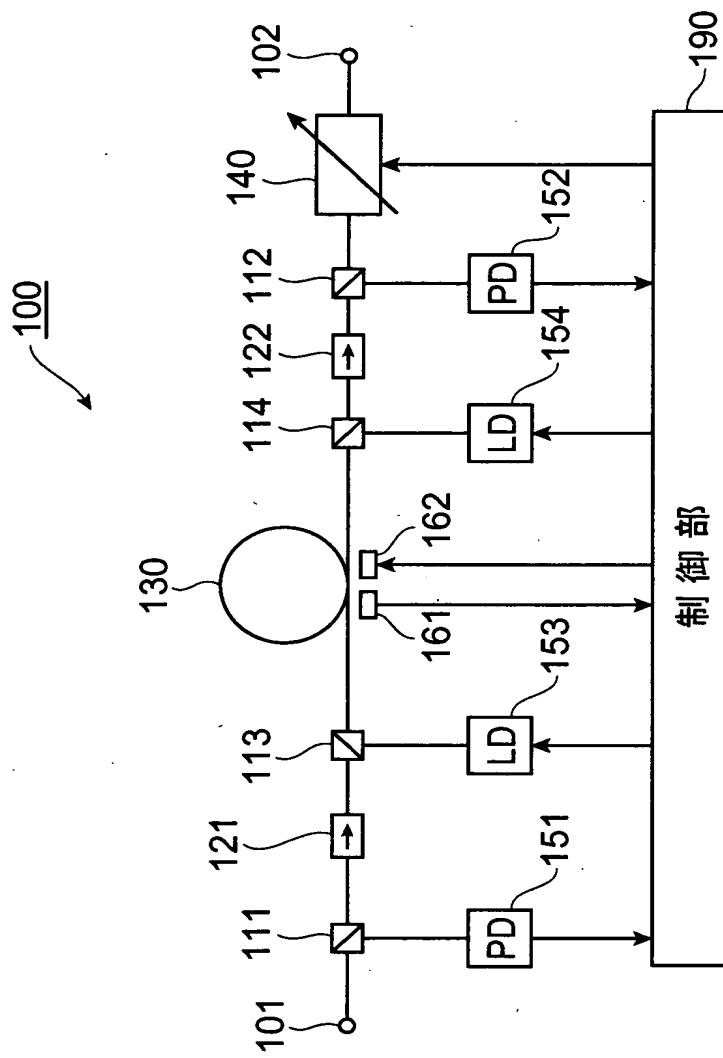
【書類名】

図面

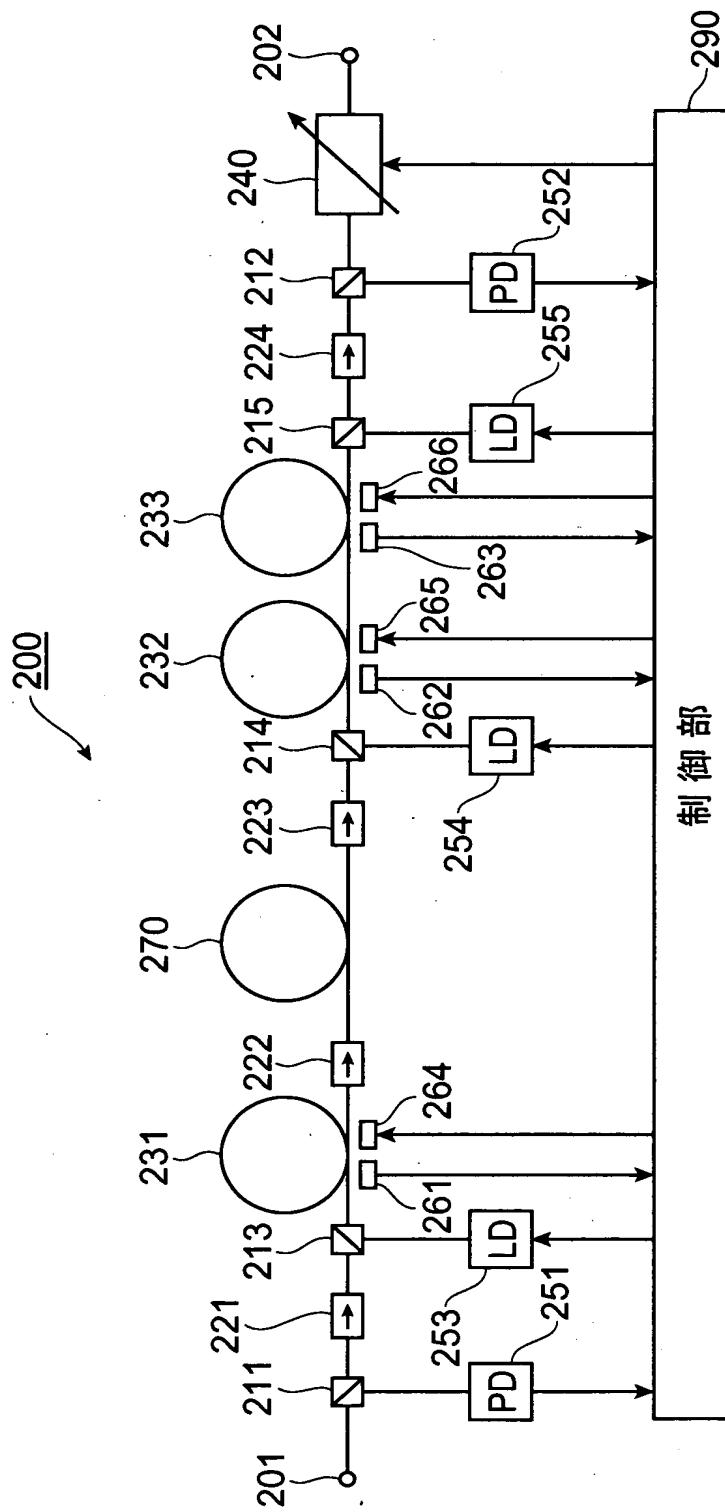
【図1】



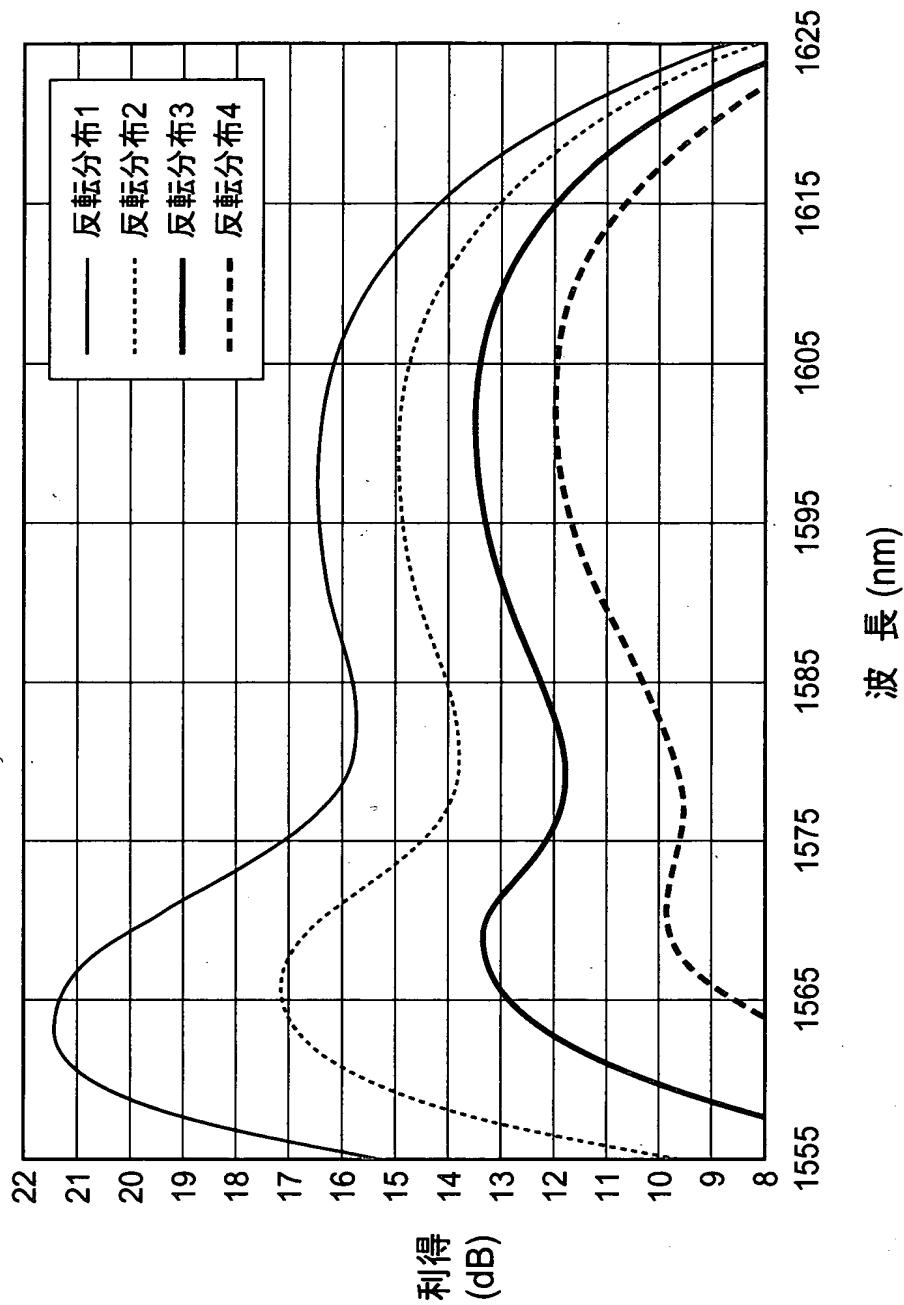
【図2】



【図3】

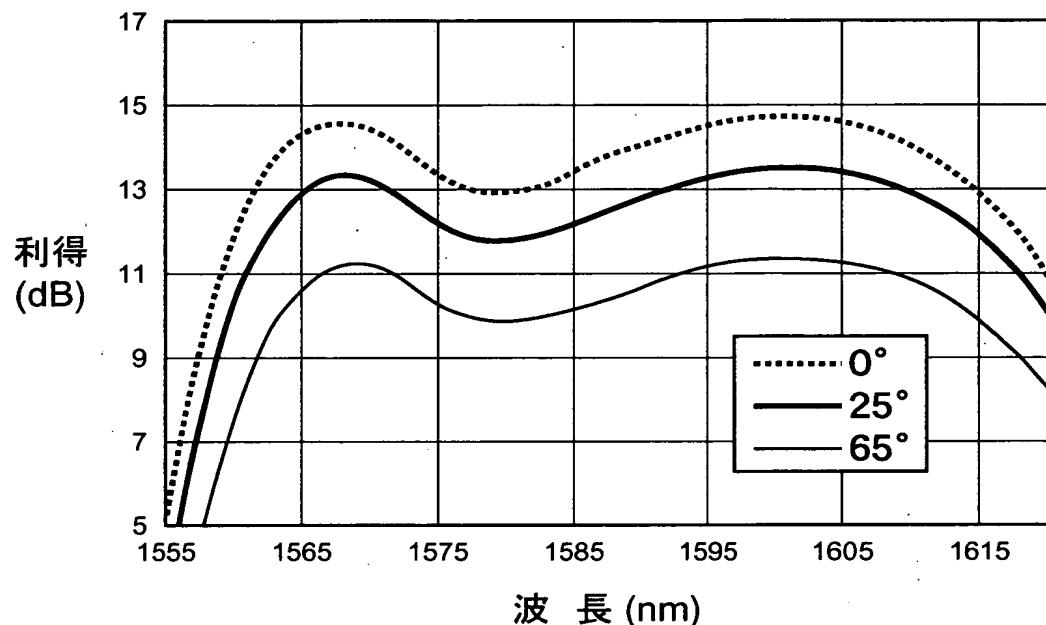


【図4】

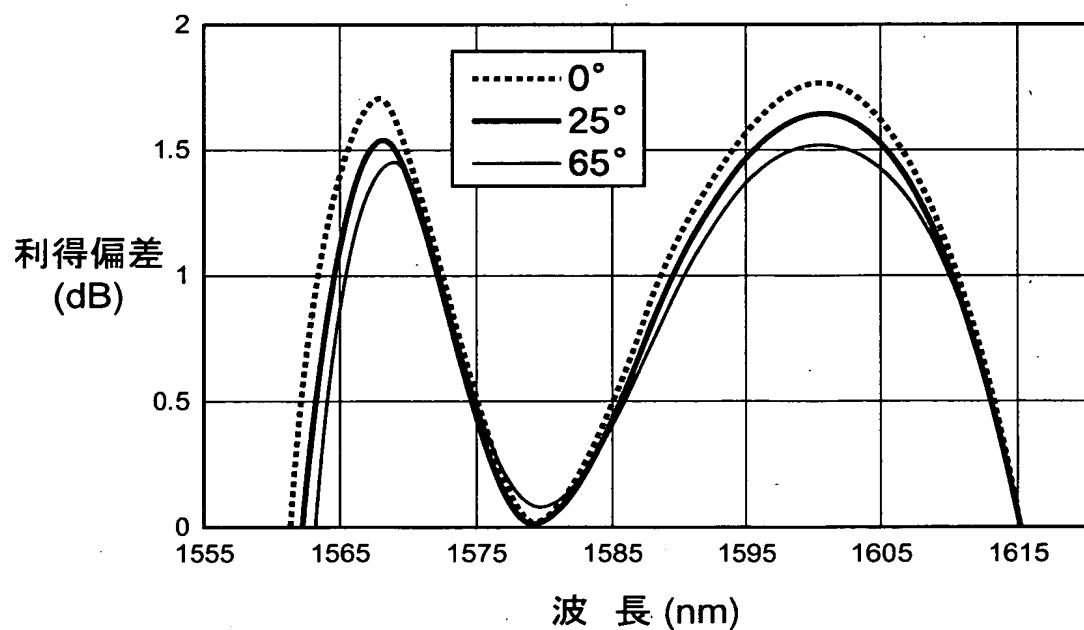


【図5】

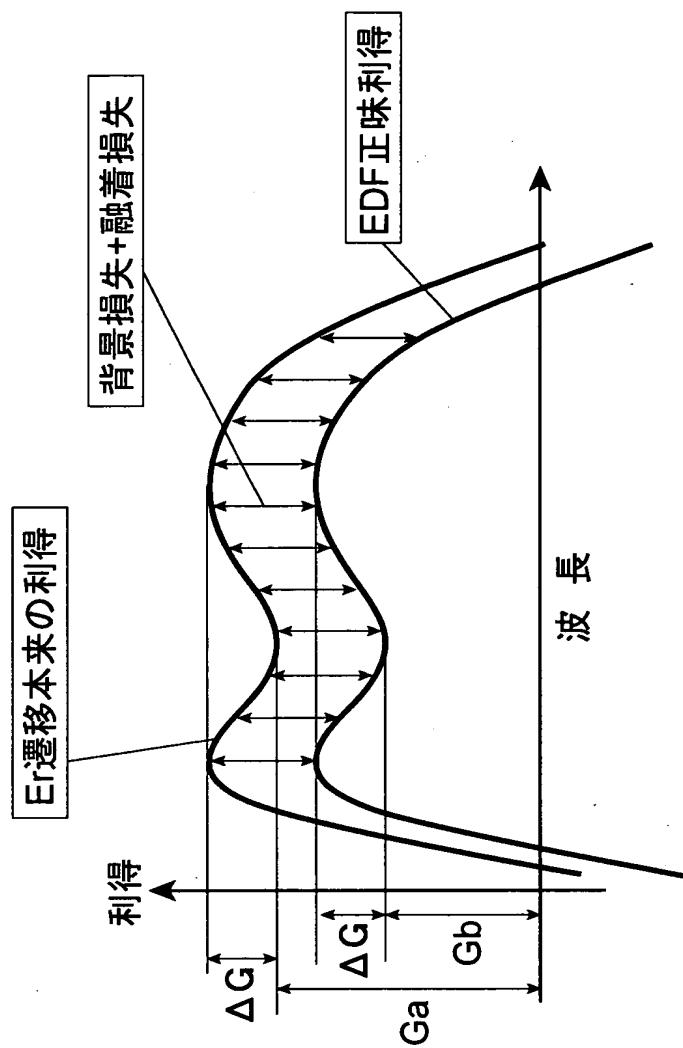
(a)



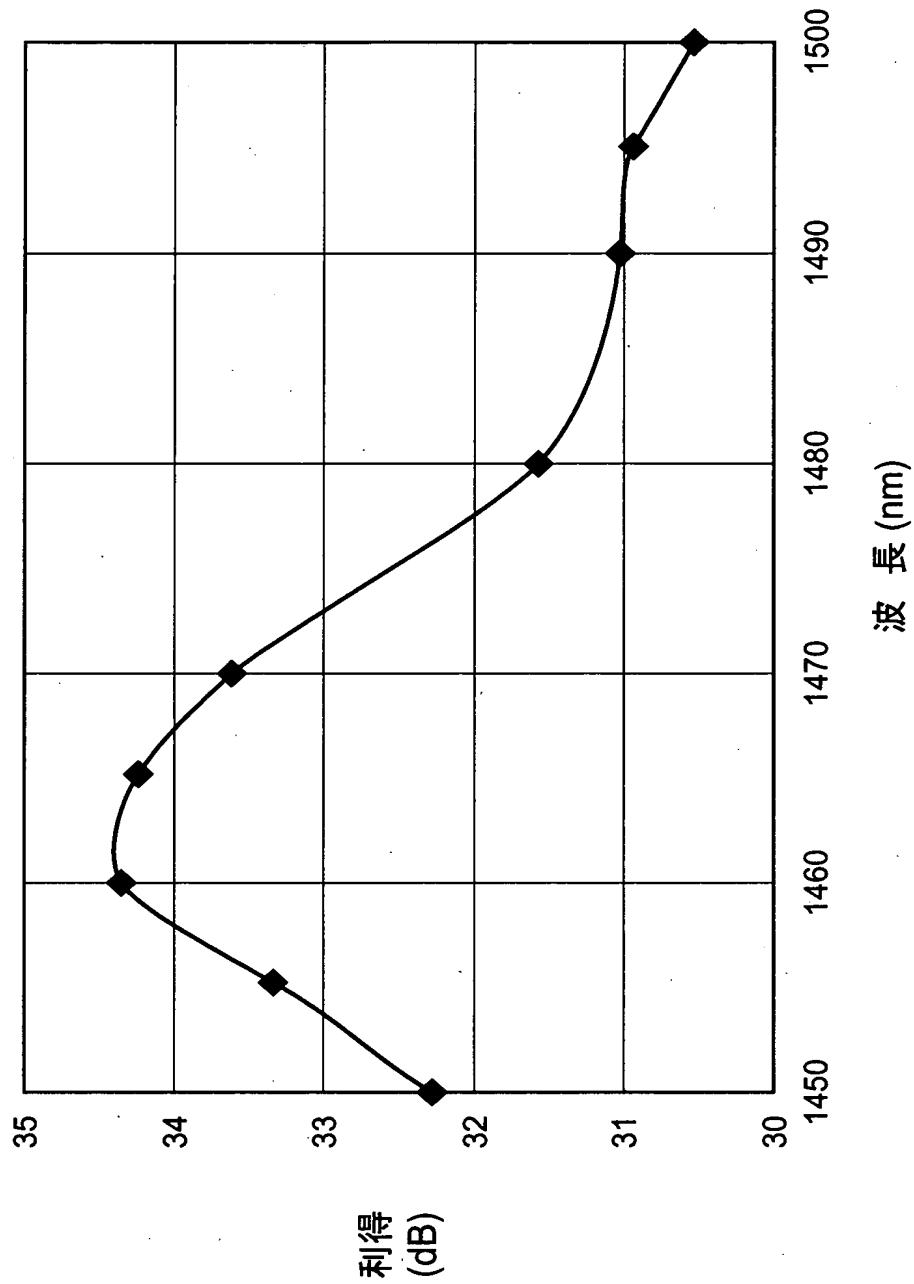
(b)



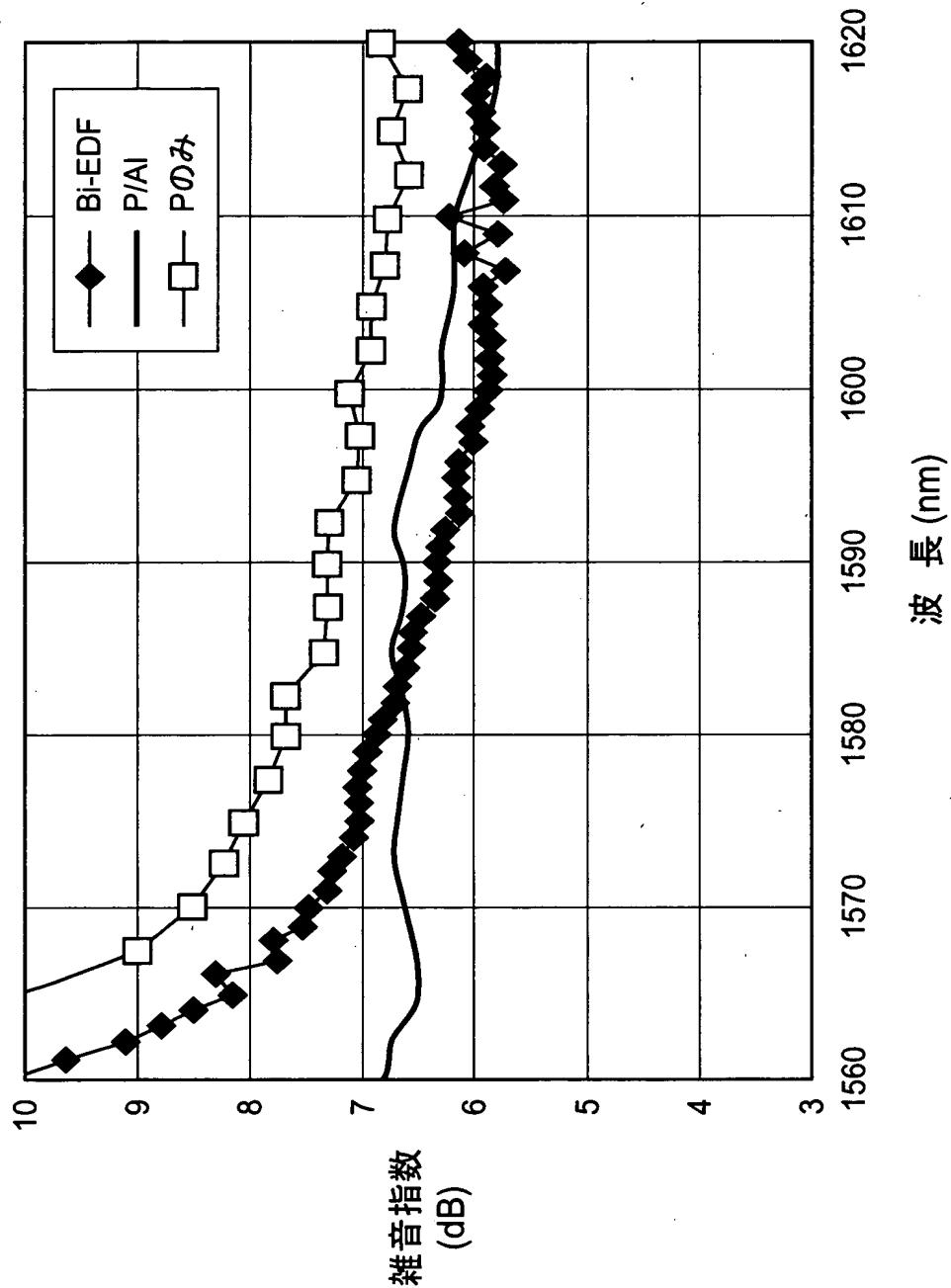
【図6】



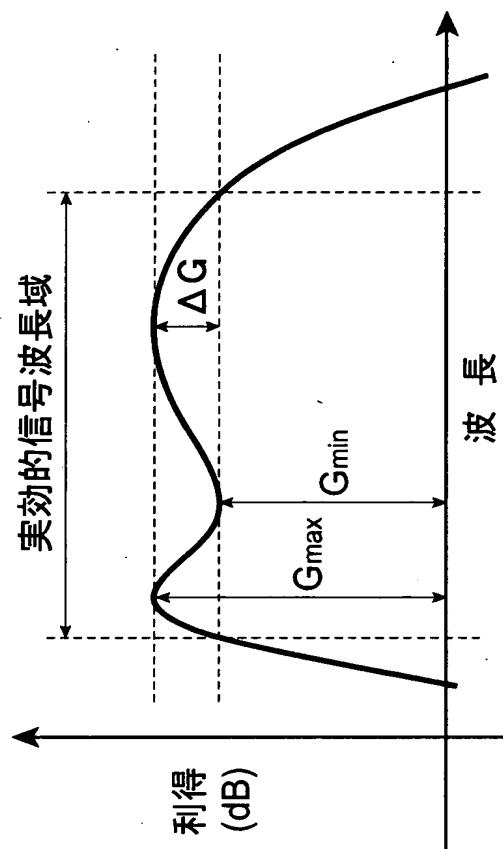
【図7】



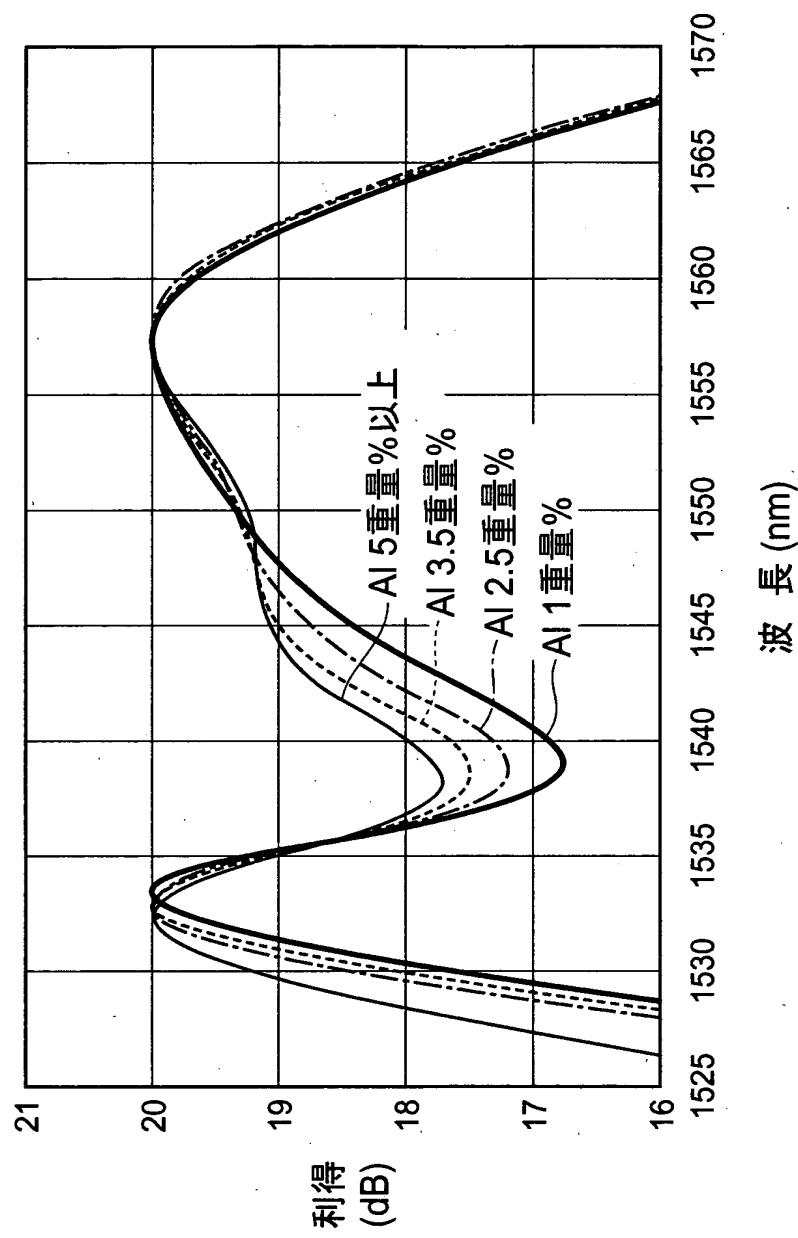
【図8】



【図9】



【図10】



【書類名】 要約書

【要約】

【課題】 Lバンドにおいて広帯域の実効的信号波長域で小さい相対利得偏差を有することができる実用的な光増幅モジュールおよび光増幅装置を提供する

【解決手段】 励起光源153, 154より出力された励起光源は、光カプラ113, 114を経て、Bi系EDF130へ供給される。入力端101に入力したLバンドの多波長の信号光は、光カプラ111、光アイソレータ121および光カプラ113を経てBi系EDF130に入力して、このBi系EDF130において一括光増幅される。Bi系EDF130において光増幅された多波長の信号光は、光カプラ114、光アイソレータ123および光カプラ112を経て光損失部品140へ入力して、この光損失部品140において所定の損失を被る。そして、光損失部品140より出力された多波長の信号光は、出力端102により出力される。

【選択図】 図2

出願人履歴情報

識別番号 [000002130]

1. 変更年月日 1990年 8月29日

[変更理由] 新規登録

住 所 大阪府大阪市中央区北浜四丁目5番33号

氏 名 住友電気工業株式会社